

# 사용후핵연료 저장조 사고시 핵연료 파손 거동 평가 시험

방제건\*, 김대호, 김선기

한국원자력연구원, 대전광역시 유성구 대덕대로 989번길 111

\*jgbang@kaeri.re.kr

## 1. 서론

사용후핵연료 저장조 냉각기능 상실 사고시 핵연료의 급격한 온도상승으로 인해 고온의 공기와 수증기 분위기에서 산화반응이 발생하고 고온변형과 ballooning이 수반되며, 이에 따른 핵연료 파손이 발생할 수 있다. 열팽창으로 인한 펠렛에 의한 피복관 내면에 작용하는 후프방향 인가응력이 피복관의 파손을 야기시키는 거시적 파손기구로 작용할 수 있다. 이에 본 연구에서는 사용후피복관의 열화상태를 모사한 피복관을 대상으로  $UO_2$  펠렛의 산화에 따른 부피팽창에 의한 피복관 변형을 분석하고, ballooning에 의한 파손거동을 모사하기 위한 파손거동 종합시험을 수행하였다. 사용후핵연료 저장조 사고 조건에 해당하는 온도범위( $600^{\circ}C \sim 1,400^{\circ}C$ ) 및 핵연료 열화범위를 포함한 다양한 실험조건에서의 핵연료 파손거동을 평가하였다.

이러한 종합효과 검증시험을 통한 핵연료 파손은 공기 및 수증기 혼합분위기에서의 산화에 따른 피복관의 추가적인 취화, 봉내압 및 온도상승에 따른 ballooning 등에 의해 발생할 것으로 예상된다. 그러므로 다양한 시험 matrix를 구성하여 각 파손기구별 영향을 정확히 평가하는 시험이 요구된다. 또한, 단위시험을 통해 개발된 산화모델 및 다양한 파손기구별 모델들로 구성된 종합파손평가 모듈을 개발하여, 온도 변화, 핵연료 압력변화 및 시간에 따른 다양한 파손 시점 및 경향을 평가에 활용한다.

## 2. 본론

### 2.1 시험 장치

핵연료 파손거동 종합시험장치(Fig. 1)는 반응로 파트, High Pressure Air Compressor 파트, 냉각장치, Controller System 등으로 구성되어 있다. 장치의 기본적인 운전조건은 아래와 같다.

- 운전 조건 : 수증기분위기, 공기분위기, 수증기/공기 혼합분위기

- 열원의 온도 : 상온  $\sim 1,500^{\circ}C$
- 운전시간 : 8 hour/day (연속운전)

### 2.2 시험 결과

본 시험에서는 사용후핵연료 저장조 사고시 핵연료 파손거동을 예측하기 위해 저장조 사고조건인 공기분위기에서의 산화과정(열화)을 포함한 ballooning 변형 및 파손의 전과정을 종합적으로 검증하는 시험을 수행하였다.

ballooning 변형 및 파손시험의 경우 사용후핵연료봉을 모사하기 위해 봉내압 50기압, 70기압, 100기압으로 가압한 30 cm짜리 핵연료 시험봉을 제작하여 시험에 적용하였다. 그 결과 사고조건 범위내 온도상승 조건( $10^{\circ}C/min$ )에서 50기압 핵연료봉의 경우 약  $600 \sim 650^{\circ}C$  온도범위에서 ballooning에 의한 파손이 발생하였으며, 100기압 핵연료봉의 경우에는 좀 더 이른 사고 시간대, 즉 낮은 온도 범위인  $550 \sim 600^{\circ}C$  온도범위에서 ballooning에 의한 파손이 발생하였다. 저장조 사고 시 사고 시나리오에 따라 핵연료 온도상승 속도가 달라질 수 있는데, 이러한 핵연료 온도상승 속도에 따른 ballooning 변형 및 파손 거동의 차이를 확인하기 위해 온도상승 속도를  $2^{\circ}C/min$  기준으로 동일 시험을 수행하였는데, 사고 시 온도상승 속도는 핵연료의 봉내압, 온도 영향에 비해 ballooning에 의한 파손거동에는 상대적으로 영향이 적게 나타났다.

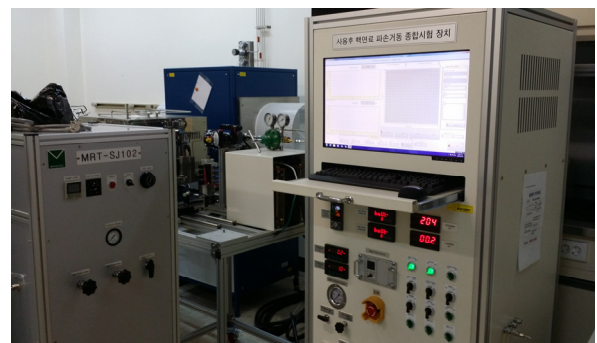


Fig. 1. Experimental apparatus for integral effects of fuel failure behavior.

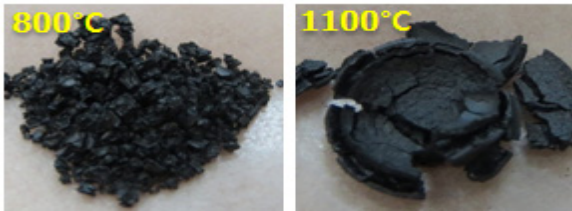


Fig. 2. Fragmentation of UO<sub>2</sub> by air oxidation.



Fig. 3. Failed fuel rod by burst (rod pressure: 50atm, heating rate: 10°C/min.).

### 3. 결론

사용후핵연료 저장조 사고조건을 반영한 공기분위기에서의 파손을 야기하는 열화 메카니즘인 산화 거동 및 파손과정을 종합적으로 모사하고 예측할 수 있는 시험자료는 매우 제한적인 현실을 감안할 때, 저장조 냉각기능/냉각수 상실 사고 시 방사능 대치방출과 밀접한 관련이 있는 핵연료파손에 이르는 시간 예측 및 열화 정도를 예측하기 위한 필수적인 자료를 생산하였다.

또한, 사용후핵연료 저장조 사고안전성을 평가하기 위한 핵연료 파손기준은 노심과 달리 현재 수립되지 않은 실정이다. 따라서 후속연구에서는 공기/수증기 혼합분위기에서의 파손거동을 종합적으로 평가하는 시험을 통해 파손기준을 수립을 위한 필수 시험자료를 생산할 필요가 있을 것이다.

### 4. 감사의 글

본 연구는 미래창조과학부 지원아래 원자력연구개발사업의 일환으로 수행되었습니다.  
(NRF-2012-2012M2A8A4013172)

### 5. 참고문헌

- [1] M. Steinbrück, "Separate-effects tests on high temperature oxidation of zirconium alloys in various atmospheres", Workshop on Computational and Experimental Studies of the LWR fuel element behaviour under beyond design basis accidents and reflood conditions, IBRAE, Moscow, 27-28 July 2009.
- [2] Martin Steinbrück, Nóra Vér, "High-Temperature Oxidation of Zircaloy-4 in Mixed Steam-Air and Steam-Nitrogen Atmospheres", Proceeding of ICAPP 2010, San Diego, CA, USA, Jun 13-17, 2010.
- [3] Martin Steinbrück, et. al, "Experiments on air ingress during severe accidents in LWRs", Nucl. Eng. Des. 236 (2006) 1709-1719.
- [4] Martin Steinbrück, "Prototypical experiments relating to air oxidation of Zircaloy-4 at high temperatures", J. Nuclear Materials 392 (2009) 531-544.
- [5] M. Steinbrück, M. Bottcher, "Air oxidation of Zircaloy-4, M5 and ZIRLO™ cladding alloys at high temperatures", J. Nuclear Materials 414 (2011) 276-285.